

3606 鋼橋りょう塗装機械の開発

正〔土〕 〇内藤 孝和（東日本旅客鉄道株式会社） 正〔土〕 露木 寿（東日本旅客鉄道株式会社）

市川 昭人（関西ペイント株式会社） 中岡 豊人（関西ペイント株式会社） 竹内 徹（関西ペイント株式会社）

芝 彰男（株式会社計測工業）

Development of steel bridge painting machine

Takakazu NAITO, East Japan Railway Company

Hisashi TSUYUKI, East Japan Railway Company

Akihito ICHIKAWA, Kansai Paint Company

Toyohito NAKAOKA, Kansai Paint Company

Tohru TAKEUCHI, Kansai Paint Company

Akio SHIBA, Keisokukogyo Company

In order to prevent rust of steel bridge, repainting construction is carried out cyclically. Repainting construction is operated by skilled workers who uses disk sander and paint brushes. But of the decrease of the skilled workers, painting machine which has high construction efficiency was required. We developed a guide-rail type painting machine which equips painting spray system for the application of box girder bridge. From the basic examination data, it was confirmed that the machine has $58\text{m}^2/\text{hour}$ efficiency and fine quality compared to the skilled worker's painting.

Keywords : repainting construction, painting, spray, box girder bridge, guide-rail

1. はじめに

鉄道の鋼橋りょうは防錆の観点から表面を塗装しているが、経年による塗膜劣化は必然的に起こり、防錆機能を保つために定期的に塗替塗装を実施しなければならない。この作業は、高所の狭隘な吊り足場内での作業であり、酷暑や寒風に曝される厳しい環境下での作業である（図1）。作業はディスクサンダーや刷毛を用いた人力作業が中心であり、鉄道が誕生して以来、140年も作業形態が変わっていない。一方で、現在は少子高齢化等の社会環境の変化によって熟練工が減少しており、労働力維持の面から機械化が望まれている。塗替塗装作業には既存塗膜を剥がす素地調整と塗装に大別されるが、本論文では塗装の機械化に取組んだ結果について報告する。

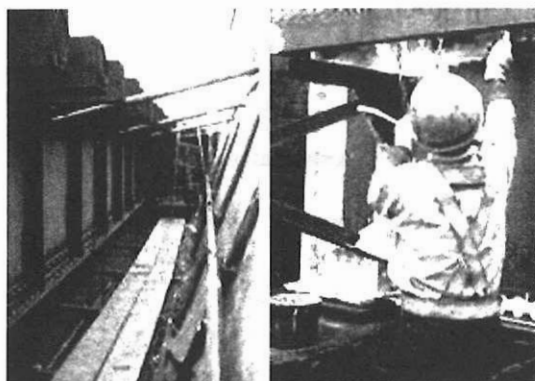


図1 吊り足場(左)と塗装作業(右)

2. 鋼橋りょう塗装機械のコンセプト

鉄道の鋼橋りょうは上路鉸桁や下路鉸桁、トラスや箱桁等の多種多様な構造が存在する。今回の開発では、平滑面が多く、機械化の効果が発揮しやすい箱桁を対象として（図2）、現行の人力塗装作業より労力軽減できる高効率の塗装機械を開発することとした。



図2 箱桁構造

塗装機械は鋼橋りょうの表面に吸着しながら塗装し、且つ障害物を乗り越える性能が必要である。鋼橋りょうには複雑な形状の部材が多数ついているため（図3）、効率的に連続的に作業をするには高い障害物乗り越え性能が求められる。既存の磁石車輪や磁石クローラ式の機械は吸着力が強い反面、障害物乗り越え性能が著しく低い課題が

あった。そこで今回は仮設レール方式を採用し、鋼橋りょう表面に障害物がある状況でも、仮設レールの高さで乗越えられる方式を採用した。仮設レールの固定には磁石を用いることとした。

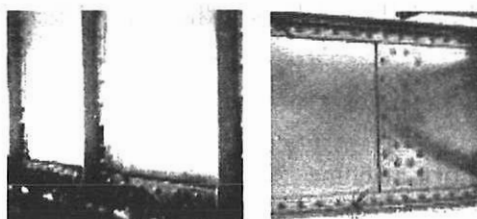


図3 鋼橋りょう表面の障害物一例
(左：補剛板、右：添接板)

次に塗装方式は、非接触式のスプレー方式を採用した。既往の研究では、塗料飛散が少ないローラー方式の塗装機械が大手橋りょう管理会社に採用されているが⁴⁾、接触式のために障害物乗越えに不向きである。そのため、非接触で塗装でき、且つ周囲への塗料飛散が少ない関西ペイント(株)の近接・適性霧化スプレーシステムを搭載することとした。

これらの機能を統合した機械イメージを図4に示す。磁石固定式の仮設レールを橋軸方向(X軸)の上下に2本仮設し、その上を機械が走行しながら橋軸直角方向(Y軸)に平滑面を塗装する方式とした(図5)。また、仮設レールを箱桁下面に取り付けることで、桁下面も塗装できる仕様とした。塗装機械の仕上がり品質は、従来の人力塗装以上を確保することとし、施工効率はコスト効果の観点から、人力に対して5倍以上の1層あたり50 m²/h以上を目標とした。また、平滑面以外の塗り残し部の処理や塗膜の施工品質管理のため、作業は吊り足場内で行う方式とした。吊り足場内での作業のため、機械は軽量小型で、3人以下の作業員で取り扱える仕様を目指した。

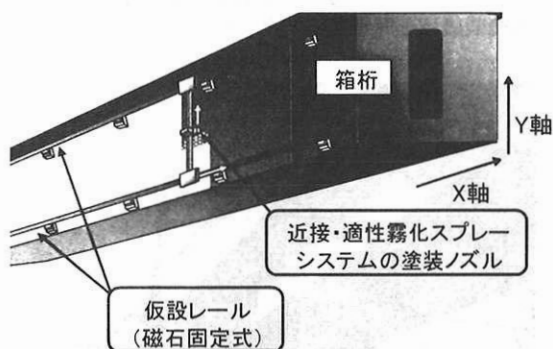


図4 塗装機械イメージ

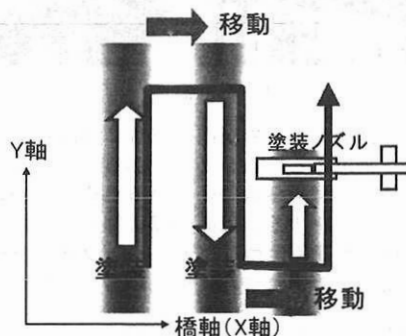


図5 塗装ノズルの施工手順

3. 近接・適性霧化スプレーシステム

通常のスプレーシステムは塗料を微粒子化して吹き付けるため、塗膜の仕上がりは良好であるが、微細な塗料粒子が周囲へ飛散しやすい問題があった。そのため、使用塗料に対する被塗物への塗着塗料の割合(塗着効率)は通常50%以下であった。

関西ペイント(株)が開発した近接・適性霧化スプレーシステムは二流体ノズル(エアースプレー)を使用し、最適な塗料粒子径と粒子速度に制御することで、周囲への塗料飛散を抑え、その結果として塗着効率を向上できるシステムである。ノズルから噴射される塗料粒子と霧化空気の流れのメカニズムについての理論式¹²⁾を図6に示す。太い実線が空気の流れを示し、細かい実線が塗料粒子の動きを示している。空気の流れと塗料粒子間の離反角度を θ とすると、 θ が小さい程空気の流れに乗って飛散しやすく、反対に θ が大きくなる程被塗物に付着しやすいことがわかる。すなわち、 θ は塗料粒子径と空気の流れ速度と密接な関係があり、吹き付け角度が鉛直方向に近づくほど塗着効率は向上するメカニズムである。

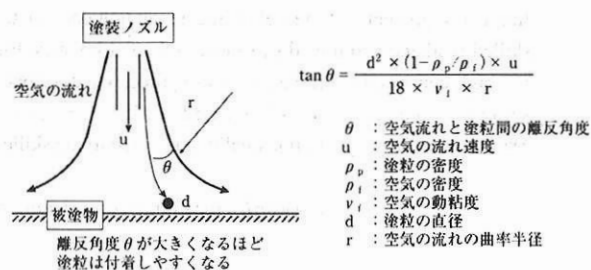


図6 霧化空気の流れと塗着メカニズム

4. 塗装ノズルの製作

目標の施工効率50 m²/h以上を達成するためには、既存の塗装ノズルよりノズル数を増やして施工幅を広げる必要がある。ノズル数を増やした場合、中央と端部のノズルでは塗料吐出量に差が出やすく、塗装斑の原因になる。そこで、本開発では各ノズルの塗料吐出量に差の無いように、各ノズルへの塗料流路長を等しくする工夫を施した(図7)。シミュレーションの結果から、塗膜の平滑性を確保しながら目標効率を達成するために、16本のノズルを千鳥配置にしたものを製作した(図8)。

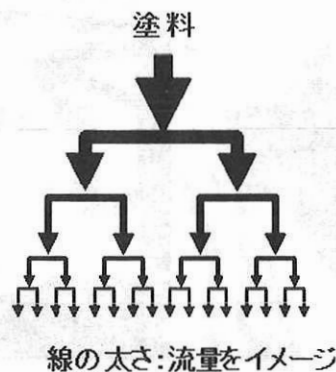


図7 塗装ノズル内の分液機構

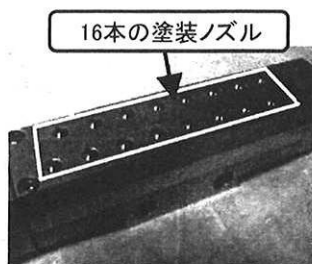


図8 製作した塗装ノズル

5. 塗装機械の基礎試験

4. で製作した塗装ノズルを、図9に示すような試験装置に搭載して、工場内で基礎試験を実施した。基礎試験ではY軸移動速度・塗装ノズルと被塗面の離隔を変化させながら形成塗膜の品質を検証した。試験に使用した塗料は、JR東日本の鋼橋りょう塗替塗装で一般的に使われている厚膜型変性エポキシ樹脂系塗料（目標膜厚 $60\mu\text{m}$ ）である。



図9 試験装置（壁面を塗装）

5.1 塗装ノズルのY軸移動速度の評価試験

塗装ノズルのY軸移動速度は速いほど施工効率が向上する。そのため、移動速度を変化させた場合の性能確認試験を実施した。その結果、表1に示すように 500mm/s （予想施工効率： $60\text{m}^2/\text{h}$ ）まで速度向上しても目標膜厚 $60\mu\text{m}$ を十分確保できることを確認した。

表1 塗装ノズルのY軸移動速度の評価

Y軸移動速度 (mm/s)	150	300	500
予想施工効率 (m^2/h)	34	50	60
塗料吐出量 (g/min)	235	440	670
塗装膜厚 (μm)	72	77	73
塗着効率 (%)	91	94	94

※塗装ノズルと被塗面の離隔：50mm

5.2 塗装ノズルと被塗面の離隔評価試験

塗装ノズルと被塗面の離隔は大きいほど障害物を乗り越えやすく、効率的に連続的に作業をすることが可能にな

る。そのため、離隔を変化させた場合の性能確認試験を実施した。その結果、表2に示すように離隔を250mmに拡大しても、目標膜厚 $60\mu\text{m}$ を凡そ確保できることが分かった。

表2 塗装ノズルと被塗面の離隔評価

離隔 (mm)	50	100	200	250
塗装膜厚 (μm)	74	66	63	59
塗着効率 (%)	94	94	91	88

※塗装ノズルのY軸移動速度：300mm/s

5.3 基礎試験の結果

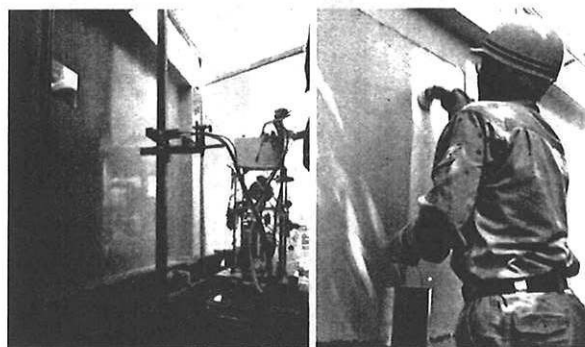
以上の試験結果より、製作した塗装ノズルの仕上がり品質に関する基礎データを取得することが出来た。また、塗装ノズルと被塗面の離隔を大きくしても飛散が少なく、塗着効率88%を確保できることも確認した。最後に、他の塗料（水系エポキシ塗料・水系上塗塗料・シリコン変性エポキシ塗料・ハイソリッド厚膜型変性エポキシ樹脂系塗料）の性能確認試験も実施したが、同様に安定して塗装できることを確認した。

6. 塗装機械の屋外試験

次に試験装置は、屋外環境にある箱桁を模した試験桁を用いて試験を実施した。試験は夏季と冬季の2回実施し、気温の違いによる仕上がり品質を検証した。また、従来の人力塗装の仕上がり品質との違いも検証するため、比較試験を実施した。

6.1 夏季屋外試験

図10に示すように、試験装置と人力塗装（刷毛）のケースに分けて、それぞれ 1m^2 範囲を塗装して仕上がり品質を確認した。使用した塗料の構成は、厚膜型変性エポキシ樹脂系塗料（目標膜厚 $60\mu\text{m}$ ）を2層、ポリウレタン樹脂系塗料（目標膜厚 $50\mu\text{m}$ ）を1層の計 $170\mu\text{m}$ である。形成された塗膜の検証のため、乾燥塗膜厚及び塗膜の目視観察、塗膜付着強度を測定した。乾燥塗膜厚は各30点ずつ測定して平均膜厚を求め、さらに標準偏差を求めて塗膜の平滑性を評価した。塗膜の目視観察はひび割れ、たれ、皺等の塗膜変状がないか調査した。塗膜付着強度は、乾燥1ヵ月後の塗膜をプルオフ法（JIS-K-5600-5-7）に準じて各5点ずつ測定して平均値を求め、健全塗膜の指標値である 2.0MPa 以上の強度があるか検証した。尚、試験時の外気温は $30\sim 32^\circ\text{C}$ 、湿度は $55\sim 64\%$ であった。試験結果を表3と図11に示す。



(a) 試験装置

(b) 人力塗装

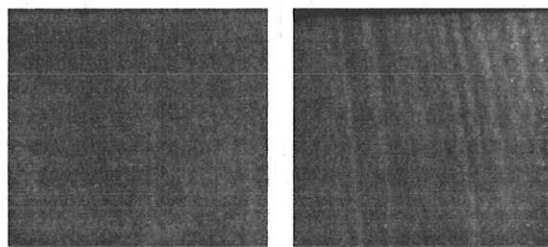
図10 夏季屋外試験

表3 夏季屋外試験結果（仕上がり品質）

施工方法	平均膜厚 (μm)	標準 偏差	塗膜目視 観察	付着強度 (MPa)
試験装置	177	9.2	変状なし	4.0
人力塗装	276	30.8	変状なし	4.2

※試験装置の塗装ノズルと被塗面の離隔は 50 mm

※試験装置のY軸移動速度は 300 mm/s



(a) 試験装置

(b) 人力塗装

(刷毛筋が残る)

図11 夏季屋外試験の形成塗膜

表3に示すように、人力塗装によって形成された塗膜は目標膜厚 $170\mu\text{m}$ に対して $100\mu\text{m}$ 以上厚く塗る傾向があったが、試験装置は平均 $177\mu\text{m}$ であり、目標膜厚と殆ど誤差がないことが分かった。さらに試験装置の形成塗膜の標準偏差も非常に小さく、平滑性に優れていることを確認した。塗膜付着強度は両方とも 2.0MPa 以上であり、健全であることを確認した。以上の結果より、試験装置は人力塗装と比べて良好な塗膜厚分布を形成できることを確認した。

6.2 冬季屋外試験

冬季屋外試験では、試験装置を図4に示した磁石固定式の仮設レールに搭載して試験した（図12）。磁石はネオジム磁石等を用いた。試験装置を用いて 0.52m^2 範囲を塗装し、仕上がり品質と施工効率を確認した。使用した塗料の構成は、厚膜型変性エポキシ樹脂系塗料（目標膜厚 $60\mu\text{m}$ ）を1層、ポリウレタン樹脂系塗料（目標膜厚 $50\mu\text{m}$ ）を1層の計 $110\mu\text{m}$ である。尚、試験時の外気温は $3\sim 10^\circ\text{C}$ 、湿度は $55\sim 74\%$ であった。試験結果を表4～5に示す。

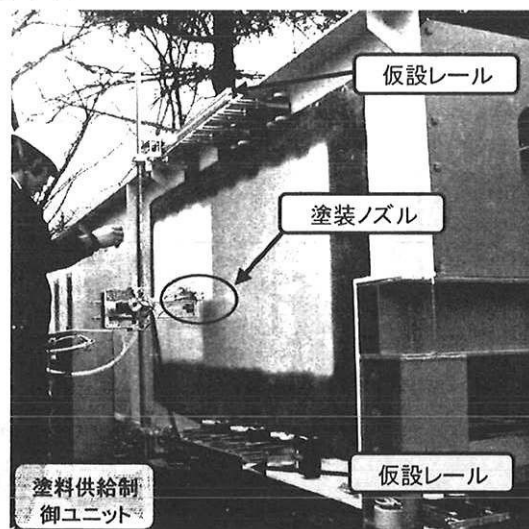


図12 冬季屋外試験

表4 冬季屋外試験結果（仕上がり品質）

施工方法	平均膜厚 (μm)	標準偏差	塗膜目視観察
試験装置	111	4.5	変状なし

※試験装置の塗装ノズルと被塗面の離隔は 50 mm

※試験装置のY軸移動速度は 300 mm/s

表5 冬季屋外試験結果（施工効率）

使用塗料	施工面積 (m^2)	施工時間 (秒)	施工効率 (m^2/h)
厚膜型変性エポキシ樹脂系塗料	0.52	35	54
ポリウレタン樹脂系塗料	0.52	30	62
平均			58

※試験装置の設定は上記と同じ

表4に示すように、試験装置によって形成された塗膜は目標膜厚 $110\mu\text{m}$ に対して平均 $111\mu\text{m}$ であり、殆ど誤差がないことが分かった。さらに、表5に示すように施工効率は平均 $58\text{m}^2/\text{h}$ であり、目標の $50\text{m}^2/\text{h}$ 以上を達成したことを確認した。

7. まとめ

今回箱桁用開発した塗装機械は、目標の施工効率を上回る $58\text{m}^2/\text{h}$ の性能を発揮した。また、仕上がり品質は季節を問わず、従来の人力塗装と比べて良好な塗膜厚分布を形成できることを確認した。さらに目標膜厚に対して殆ど誤差なく塗装できるため、厚く塗る傾向があった人力塗装と比べて、使用塗料量の減少も可能になる。

現在はこの試験結果を反映し、実用性を高めるために適用範囲の拡大等の改良を機械に施している。

参考文献

- 1) 角和夫、松葉真人：省力化を目指した主塔塗替塗装、本四技報, Vol.29, pp.22-29, 2005.9
- 2) 大本宗治、田中孝司、竹内徹：ダストレス塗装システムとその応用、塗料の研究, No.133, pp.30-34, 1999.10
- 3) 市川昭人、竹内徹、檜原篤尚：壁面塗装用ダストレス塗装機の開発、塗料の研究, No.153, pp.64-69, 2011.10